

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

SEMINAR

Vizualizacija kretanja kroz virtualnu okolinu

Nenad Mikša

Voditelj: prof. dr. sc. Sven Lončarić

Zagreb, travanj, 2011.

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Povijesni razvoj sustava za predočavanje virtualne okoline	3
2.1. Sustav <i>Sensorama</i>	3
2.2. Ostali važni sustavi za vizualizaciju virtualne okoline	4
3. Primjena sustava za vizualizaciju virtualnih okolina	6
3.1. Primjena u medicini	6
3.2. Primjena u industriji	7
3.3. Primjena u prostornom planiranju i građevini	8
3.4. Primjena u arheologiji i povijesti	8
3.5. Primjena u umjetnosti	9
4. Tehnologije vizualizacije virtualnih okolina	10
4.1. Monitori i projektori	10
4.2. Prikaznici koji se stavljaju na glavu	10
4.3. Sustav <i>PanoVrama</i>	11
5. Postupci sinkronizacije u distribuiranoj vizualizaciji	14
5.1. Prijašnji radovi	14
5.2. Vremenska sinkronizacija u sustavu <i>PanoVrama</i>	15
5.3. Sinkronizacija u slučaju vizualizacije bez interakcije	16
5.4. Sinkronizacija u slučaju vizualizacije s interakcijom	18
6. Zaključak	21
7. Literatura	22
8. Sažetak	24

1. Uvod

Još od davnina je čovjek želio na neki način svoju maštu dočarati drugim ljudima. Problem je bio u predstavljanju svojih zamisli, odnosno u prikazu svojih misli na način kojeg će moći bilo koja druga osoba interpretirati. U stara vremena su ljudi svoju maštu pokušavali dočarati putem slika, zvuka, pjesme i plesa, međutim ti mediji nemaju dovoljnu ekspresivnost da se na njima izrazi kompletna ljudska mašta. Vjerojatno najbolji medij za dočaravanje ljudske mašte danas je film, odnosno video. No, čak ni video nije dovoljan da u potpunosti izrazi nečiju iole bogatiju maštu. Iako ga odlikuje pokretnost slika, video je ipak statičan jer ne omogućuje čovjeku da sam sudjeluje u sceni koja mu se prikazuje, da ju svojim akcijama mijenja po svojoj volji i da ju doživi svim svojim osjetilima.

Možda jedini način da se to ostvari jest putem vizualizacije virtualne stvarnosti. Virtualna stvarnost jest pojam koji se odnosi na računalno simulirane okoline koje mogu simulirati fizičku prisutnost u mjestima koje bilo postoje u stvarnom svijetu, bilo u zamišljenom svijetu [12]. Virtualnu stvarnost je potrebno na neki način vizualizirati, odnosno predočiti korisniku. Najčešći tip predočavanja virtualne stvarnosti jest vizualizacija pomoću videa ili slika u kombinaciji sa zvukom. Pri tome se korisniku pomoću određenih uređaja omogućuje interakcija s virtualnim svijetom. Primjer takve vizualizacije su računalne igre. Igrač pomoću miša, tipkovnice i eventualno drugih uređaja poput palice za igru (eng. *joystick*) kontrolira svoje pomake po virtualnom svijetu te svojim akcijama mijenja ili pomiče neke objekte koji postoje u virtualnom svijetu.

Osim vizualizacije mogući su i drugi načini predočavanja virtualne stvarnosti, poput predočavanja zvukom, tekstom, mirisom, opipom itd. Predočavanja mirisom i opipom su vrlo rijetka te se koriste eventualno u kombinaciji s vizualizacijom. Naime, postoje određeni tehnološki problemi pri izvedbi sustava koji korisniku može predočiti virtualni svijet putem mirisa. Predočavanje opipom se najčešće koristi u obliku vibracije *gamepada* u računalnim igrama ili naglim pokretima samog simulatora, poput npr. simulatora leta ili simulatora vožnje.

Predočavanje virtualne stvarnosti tekstom je bilo vrlo popularno u ranim danima računarstva i Interneta, no postoji i danas. Riječ je, naime, o igrama koje korisnika stavljaju u neku ulogu u virtualnom svijetu te on mora obavljati neke zadaće u tom svijetu (engl. *Role-playing game*, RPG). Međutim, sučelje koje korisnik ima je tekstualno (engl. *Text-based RPG* [10]) – u svakom koraku se tekstom opisuje virtualni svijet u kojem se korisnik nalazi, a na korisniku je da si ga sam vizualizira. Interakcija s virtualnim svijetom se vrši pomoću tekstualnih naredbi sličnih konzolnim naredbama ljsuke u operacijskom sustavu.

Dakle možemo zaključiti da je predočavanje virtualnih svjetova vrlo važno u ljudskim životima, bilo da je riječ o zabavi, simulaciji stvarnih događaja, znanstvenom istraživanju, umjetnosti ili dizajnu i planiranju životnih prostora. Stoga je važno razvijati sustave za predočavanje virtualnih svjetova kako bi isti što realističnije vršili svoju zadaću.

2. Povijesni razvoj sustava za predočavanje virtualne okoline

Gotovo svako umjetničko djelo u povijesti možemo smatrati pokušajem predočavanja virtualne okoline. To se posebice odnosi na 360° cilindrične zidne freske kakve su se počele pojavljivati u drugoj polovici 19. stoljeća [12]. Međutim, tek pojavom sustava koji omogućuju korisničku interakciju s virtualnim svijetom započinje era pravih sustava za vizualizaciju virtualne okoline.

Vjerojatno prvi takvi sustavi su simulatori konja i vozila koji se pojavljuju početkom dvadesetog stoljeća. Takvi simulatori su se sastojali od drvene konstrukcije ili kabine u koju je korisnik ušao ili se na nju popeo te određenim kontrolama dostupnima u tom simulatoru pokretao cijelu konstrukciju. Pokreti su uglavnom bili u obliku rotacije ili poskakivanja, simulirajući tako uvjete u kojima se npr. konjanik mogao naći na bojištu ili vozač automobila na cesti. Primjer sustava za simulaciju konja iz Prvog svjetskog rata je prikazan na slici 1. Sustavi poput navedenih nisu ni na koji način vizualizirali virtualni svijet, nego su se samo fokusirali na simulaciju i predočivanje određenih uvjeta koji postoje u virtualnoj okolini, poput neravne ceste, neposlušnog konja i sl.

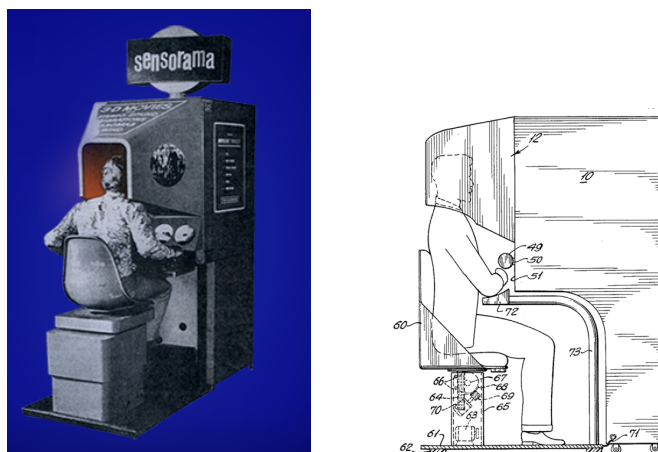


Slika 1: Drveni mehanički simulator konja iz Prvog svjetskog rata

2.1. Sustav *Sensorama*

Prvi pravi sustav za predočavanje virtualne okoline bio je sustav *Sensorama* kojeg je 1962. godine napravio Morton Heilig [11]. Sustav *Sensorama* je korisniku omogućio doživljaj virtualne okoline gotovo svim svojim osjetilima. Sustav je mogao prikazati stereoskopski 3D video velike širine, omogućavala je naginjanje korisnikovog tijela za dočaravanje gibanja, zvuk je bio puštan u stereo tehnici, a postojala je i mogućnost

stvaranja vjetra i puštanja određenih mirisa.



Slika 2: Sustav *Sensorama*. Na lijevoj slici je prikazan izgled sustava, a na desnoj nacrt koji je priložen uz prijavu patenta.

Sensorama nije imala mogućnost interakcije korisnika s virtualnom okolinom, već je predstavljala svojevrsnu metodu za predočavanje virtualne okoline korisniku putem svih njegovih osjetila. Ideja je bila da sustav zamijeni standardna kina, budući da isti omogućuje puno vjerniji prikaz sadržaja. Međutim, zbog mogućnosti prikaza raznih sadržaja, potrebno je bilo snimati i filmove koji su se mogli prikazivati na tom sustavu. Filmovi su se snimali pomoću stereo kamere s čak 3 objektiva koja su služila za postizanje veće širine videa i dobivanje stereo 3D efekta. Osim video i audio zapisa, na traku s filmom je bilo potrebno dodati i upravljačke informacije za naginjanje tijela korisnika, pokretanje i zaustavljanje ventilatora za generiranje vjetra te ispuštanje određenih mirisa u određenim dijelovima filma.

Heilig je za demonstraciju svog sustava snimio čak 5 filmova od kojih je najpoznatiji bio simulacija vožnje motocikla Brooklynom. Gledatelj je mogao osjetiti vjetar u svom licu, vibracije sjedala motocikla, 3D stereo pogled okoline, stereo zvukove okoline pa čak i smrad grada [8]. Nažalost, zbog nemogućnosti pronalaska sponzora za financiranje svog projekta stvaranja kina novog doba, Heilig je odustao od rada na sustavu *Sensorama* te je navedeni sustav ostao samo kao zanimljivost u proučavanju razvoja sustava za vizualizaciju virtualnih okolina.

2.2. Ostali važni sustavi za vizualizaciju virtualne okoline

Nakon sustava *Sensorama* pojavljuje se mnoštvo različitih sustava za vizualizaciju virtualnih svjetova. Već 1968. godine je Ivan Sutherland napravio prvi prikaznik koji se stavlja na glavu (engl. *Head Mounted Display*, HMD). Jedan od bitnijih sustava za

vizualizaciju je i tzv. *Aspen Movie Map* koji je korisniku omogućavao virtualnu šetnju gradom Aspen u državi Colorado uz dva različita načina prikaza informacija korisniku. Prvi način je bio pomoću fotografija te je korisnik mogao odabrati želi li šetati gradom ljeti ili zimi. Za te potrebe su autori sustava fotografirali gotovo svaku moguću poziciju u gradu i to tijekom ljeta i tijekom zime. Taj način rada podsjeća na današnji sustav *Google Street View*. Drugi način prikaza je bio pomoću poligona koji su predočavali jednostavan 3D model grada. *Aspen Movie Map* je napravljen 1977. godine na MIT-u (*Massachusetts Institute of Technology*).

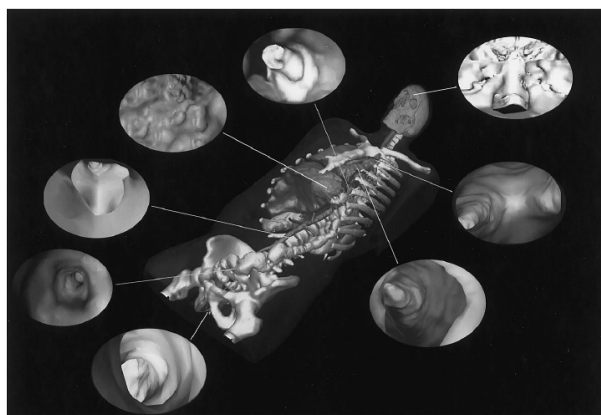
Još jedan od povijesno važnijih sustava za vizualizaciju virtualne okoline je NASA-in (*National Aeronautics and Space Administration*) sustav za upravljanje vozila na Marsu u prividno stvarnom vremenu unatoč velikoj vremenskoj razlici pri putovanju signala od Zemlje do Marsa i natrag. Sustav je kombinirao video informacije koje su dolazile s vozila na Marsu sa računalnom simulacijom koja se je izvodila na lokalnom računalu kako bi se ostvario privid stvarnog upravljanja udaljenog vozila. Prvotna verzija sustava je izrađena u devedesetim godinama dvadesetog stoljeća, no isti se unapređuje i danas.

3. Primjena sustava za vizualizaciju virtualnih okolina

Kao što se već daje zaključiti iz prethodnog poglavlja, sustavi za vizualizaciju virtualnih okolina su prvenstveno stvarani s namjerom simulacije opasnih situacija bez ugrožavanja života ili jednostavno zbog zabave. Međutim, tijekom vremena i tijekom razvoja sustava za vizualizaciju ljudi su primijetili da je sustave za vizualizaciju moguće koristiti i u druge svrhe. Već je spomenuti primjer sustava za upravljanje udaljenim vozilima kojeg je razvila NASA, međutim postoji još raznih primjera primjene sustava za vizualizaciju virtualnih okolina.

3.1. Primjena u medicini

U medicini se sustavi za vizualizaciju virtualnih okolina koriste na dva različita načina. Prvi način predstavlja generiranje virtualnog modela čovjeka temeljem slika dobivenih na različite načine poput računalne tomografije, magnetske rezonance i sl. Liječnik zatim koristeći sustav za vizualizaciju istražuje dobiveni model čovjeka te traži razne nepravilnosti, tumorske mase i sl. Opisana metoda se naziva virtualna endoskopija [7].



Slika 3: Primjer rezultata virtualne endoskopije.

Na slici 3 možemo vidjeti primjer modela generiranog postupkom virtualne endoskopije. Vidljiv je cijeli 3D model čovjeka, a svaki dio modela možemo posebno istraživati krećući se kroz njega. Virtualna endoskopija je danas tek u svojim začecima, no ima velike potencijale da postane uobičajena metoda medicinske pretrage u budućnosti. To može zahvaliti svojoj bezbolnosti, budući da pacijent biva jedino skeniran pomoću uređaja za dobivanje različitih vrsta slika, jer ne postoji potreba za rezanjem tkiva.

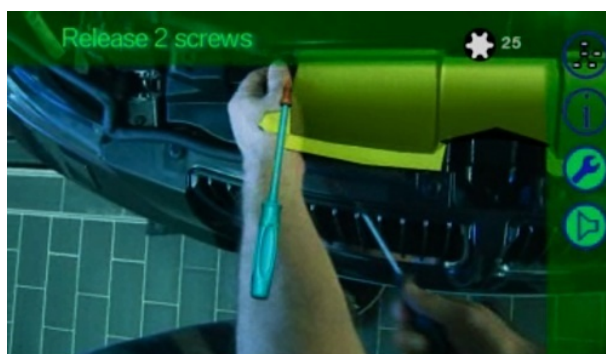
Drugi način korištenja sustava za vizualizaciju virtualnih okolina u medicini je u

terapeutske svrhe. Iskustva s virtualnih svjetova olakšavaju pacijentima preboljenje raznih strahova pa se sustavi za vizualizaciju virtualnih okolina često koriste za liječenje raznih vrsta fobija i post-traumatskog stresnog poremećaja (PTSP).

3.2. Primjena u industriji

Sustavi za vizualizaciju virtualnih okolina se često u industriji koriste za dizajniranje proizvoda, osmišljavanje i simulaciju proizvodnog procesa te za simulaciju rada samog proizvoda. To se najčešće odnosi na automobilsku, zračnu i pomorsku industriju. Razni sustavi virtualnih stvarnosti olakšavaju dizajniranje novih dijelova automobila, zrakoplova, brodova ili podmornica bez potrebe da se loša verzija zaista i proizvede pa tek onda testira. Pomoću takvih sustava moguće je izsimulirati i iztestirati proizvod gotovo u potpunosti čak i prije nego isti uopće i krene u proizvodnju. Naravno, zbog nesavršenosti sustava za simulaciju i sustava virtualne stvarnosti u današnje vrijeme je ipak potrebno napraviti testiranje proizvoda nakon što bude proizveden, no greške koje se mogu uočiti u postupku simulacije se mogu ispraviti prije same proizvodnje. Na taj način se smanjuju cijena i vrijeme razvoja novog proizvoda.

U posljednje vrijeme ubrzano napreduje razvoj sustava za vizualizaciju proširene stvarnosti. Naime, riječ je o sustavima koji uz prikaz stvarnog video signala dobivenog iz kamere koja snima pravi svijet prikazuju i računalno generirane objekte. Na taj način se vizualizira tzv. proširena stvarnost, budući da se na istoj vizualizaciji kombinira stvarna i virtualna okolina. Praktična primjena takvih sustava je vrlo raznolika – od ciljnikog sustava vojnih aviona do naočala za pomoć u servisiranju automobila [6]. Primjer takvog sustava je prikazan na slici 4, a predstavlja upute mehaničaru pri



Slika 4: Sustav proširene stvarnosti koji daje upute koje vijke treba otpustiti

popravku automobila. Navedeni sustav razvija tvrtka BMW, a trebao bi poslužiti servisima da lakše otkriju i otklone kvarove na automobilima.

3.3. Primjena u prostornom planiranju i građevini

Slično kao i u industriji, u posljednje vrijeme sve više se sustavi za vizualizaciju virtualnih okolina koriste za potrebe prikaza nacрта i modela novih građevina, kompleksa i parkova. Gotovo da više i ne postoji tvrtka koja se bavi arhitektonskim dizajnom ili prostornim uređenjem, a da ne koristi sustave za vizualizaciju virtualne stvarnosti. Prilikom sastavljanja projektne dokumentacije prostornog uređenja ili građenja nove zgrade nezostavan je i nacrt budućeg zdanja uz virtualni 3D model kojeg se može pregledavati sa svih strana te virtualno iskusiti čak i prije nego što sama izgradnja počne.



Slika 5: Primjer vizualizacije virtualne okoline u prostornom planiranju. Slika prikazuje buduću izgled kompleksa „Savski park”.

3.4. Primjena u arheologiji i povijesti

Arheolozi i povjesničari sve češće u novije vrijeme koriste sustave za vizualizaciju virtualnih okolina kako bi rekonstruirali izgled gradova i mjesta u neka povijesna doba. To im često omogućuje lakši uvid u kontekst tadašnjeg života i interpretaciju povijesnih dokumenata. Osim navedenog, ti sustavi se često koriste i kako bi se običnom laiku dočarao život u stara vremena na nekom mjestu. Na taj način se korisnicima omogućuje doživljaj povijesnih događaja i života iz prve ruke. Jedan od primjera je primjer sa slike 6. Primjer pokazuje vizualizaciju starog Rima iz 320. godine za vrijeme cara Konstantina. Sustav za vizualizaciju omogućuje korisniku da prošetati starim Rimom te doživi antički svijet.

Slično postoje i sustavi koji vizualiziraju svijet dinosaura. Tako su temeljem detaljnih paleontoloških analiza rekonstruirani izgledi životinja i bilja koje je postojalo prije više milijuna godina. Štoviše, znanstvenici su rekonstruirali i životne navike tih životinja pa



Slika 6: Vizualizacija starog Rima.

je temeljem tih rekonstrukcija izgrađen virtualni jurski park kojeg je moguće posjetiti i obići.

3.5. Primjena u umjetnosti

Razne vrste umjetnika sve više koriste sustave za vizualizaciju virtualne okoline kako bi izrazili svoju umjetničku inspiraciju. Iako svaki umjetnik navedene sustave koristi na sebi svojstven način, najčešće su ipak vizualizacije glazbe, osjećaja, zamišljenih svjetova itd.



Slika 7: „Koža svijeta” francuskog umjetnika Maurice-a Benayoun-a – umjetnička primjena sustava za vizualizaciju virtualne okoline

4. Tehnologije vizualizacije virtualnih okolina

Kao što se već može naslutiti iz prethodnih poglavlja, postoje različite tehnologije za predočavanje virtualnih svjetova. Gotovo sve tehnologije uključuju neki način video prikaza, budući da se smatra da najveći udio informacije čovjek prima upravo osjetilom vida. Međutim, kao što je ranije opisano, prvi sustavi za simulacije i predočavanje virtualnih okolina nisu uključivali neki način video prikaza, bilo da isti nije bio prikladan bilo da nije bio u to vrijeme izvediv. No razvojem video tehnologija, gotovo svaki sustav za predočavanje virtualne okoline je počeo sadržavati neki podsustav za prikaz videa. Zbog toga danas već pri pomišljaju na virtualne okoline automatski pomislimo i na neki od sustava za prikaz i reprodukciju video signala.

4.1. Monitori i projektori

Prikaz i reprodukcija video signala se vrši pomoću monitora ili projektor. Iako su navedena dva uređaja različita u načinu na koji prikazuju sliku, njihova osnovna namjena je ista. Svaku vizualizaciju virtualnih okolina možemo ostvariti pomoću monitora ili projektor. Dovoljno je samo scenu iz virtualne okoline prikazati na navedenom uređaju. Za većinu korisnika je ovaj oblik vizualizacije virtualnih okolina dovoljno dobar, budući da je vrlo jeftin. Međutim, specifični tipovi korisnika, poput pilota, liječnika, itd., zahtijevaju veću dozu realističnosti prikaza virtualne okoline. Takvim korisnicima često nije dovoljno samo statički prikazati scenu iz virtualnog svijeta, nego im je potrebno i omogućiti da sami dožive iskustvo bivanja u virtualnoj okolini. Zbog toga im je potrebno omogućiti neku vrstu interakcije s virtualnom okolinom. U slučaju prikaza virtualne okoline na običnom monitoru ili projektoru, jedini način interakcije s okolinom je putem miša, tipkovnice ili sličnog uređaja. Iako su navedeni uređaji relativno jeftini, oni ne omogućuju korisniku „prirodnu” interakciju s virtualnom okolinom.

4.2. Prikaznici koji se stavljaju na glavu

Upravo iz tog razloga se često za potrebe kompletnog doživljaja virtualne okoline koriste prikaznici koji se stavljaju na glavu (engl. *Head-mounted Displays*, HMD, vidi sliku 8). Takvi prikaznici se sastoje od dva mala monitora, od kojih svaki prikazuje sliku za posebno oko. Na taj način je odmah omogućen i stereo prikaz virtualne okoline koji korisniku omogućuje 3D percepciju okoline. Nadalje, takvi prikaznici često dolaze u kombinaciji sa slušalicama koje reproduciraju stereo zvuk i rukavicama koje korisniku omogućuju interakciju s virtualnom okolinom. Osim navedenog, prikaznici često sadrže i sustav za detekciju orijentacije i nagiba što korisniku omogućuje da pokretima glave

okreće i „glavu” virtualnog lika u virtualnoj okolini. To mu omogućuje da razgledava virtualni svijet sa svih strana i sa svih kutova, bez potrebe da mišem, tipkovnicom ili sličnim uređajem okreće kut i smjer pogleda na virtualnu scenu.



Slika 8: Prikaznik koji se postavlja na glavu sa rukavicama za interakciju s virtualnom okolinom

Prikaznici koji se stavljaju na glavu su vrlo dobri sustavi za vizualizaciju virtualnih okolina, međutim imaju određene nedostatke. Jedan nedostatak je njihova cijena. Naime, zbog relativno slabe popularnosti i visoke cijene izrade aplikacija koje u potpunosti iskorištavaju sve mogućnosti takvih prikaznika, cijena takvih prikaznika je relativno visoka te su takvi sustavi često nedostupni prosječnim korisnicima. Drugi problem takvih prikaznika je nemogućnost sudjelovanja više korisnika u virtualnoj okolini pomoću samo jednog sustava. Naime, svaki korisnik treba imati svoj prikaznik što dodatno povisuje troškove izrade i korištenja takvih sustava. Treći potencijalni problem je relativna glomaznost takvih prikaznika. Naime, često prikaznici budu relativno teški te predstavljaju stanovito opterećenje na vratne mišiće, što može uzrokovati razne patologije. Srećom, razvojem tehnologije noviji prikaznici te vrste postaju sve manji i lakši.

4.3. Sustav *PanoVrama*

Sustav *PanoVrama* je sustav za višeprojektorsku vizualizaciju razvijen na Fakultetu elektrotehnike i računarstva. Sustav je namijenjen za prikaz panoramskih projekcija pomoću više projektoru u svrhu dobivanja kontinuirane slike. Navedeni sustav se može koristiti i za vizualizaciju virtualnih okolina, baš kao i svaki drugi sustav za prikaz slike.



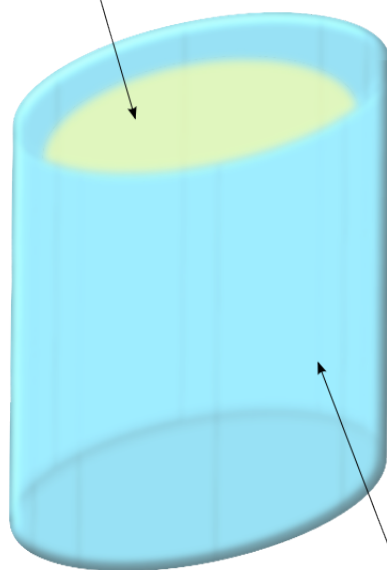
Slika 9: *PanoVrama* sustav za panoramsku vizualizaciju – planarna izvedba

Sustav se može koristiti na dva osnovna načina: planarni način i cirkularni način. Planarni način korištenja sustava *PanoVrama* je prikazan na slici 9. U tom načinu vizualizacije više projektora se koristi za prikaz široke slike na ravnom platnu, odnosno na ravnini. Svaki projektor prikazuje određeni svoj dio panoramske projekcije, a šivanje slike i korekcija osvjetljenja na preklapanju se izvode određenim matematičkim metodama implementiranim algoritamski na svakom računalu.

Valja uočiti da planarna izvedba sustava *PanoVrama* djeluje kao najobičniji monitor, odnosno ne pruža neke napredne metode vizualizacije virtualnih okolina kao što to pruža npr. prikaznik koji se stavlja na glavu. Zbog toga je sustav *PanoVrama* moguće koristiti i na cirkularni način. U tom načinu se projektori koriste kako bi se slika projicirala na cilindrično platno te na taj način popunila kut vidljivosti od 360° (vidi sliku 10). Korisnik sustava tada mora ući unutar cilindričnog platna kako bi mogao vidjeti projiciranu sliku sa svih svojih strana. Primijetimo da u tom slučaju nije potrebno pratiti orijentaciju korisnika jer se cijelo vrijeme prikazuje cijela 360° slika. Korisnik se može okretati po volji unutar platna i uvijek će vidjeti jedan dio slike.

Međutim, za potrebe promjene položaja korisnika u virtualnoj okolini ipak je potrebno koristiti dodatan izvor informacija. Za interakciju s virtualnom okolinom moguće je koristiti i rukavice poput onih koji se često koriste u paru sa prikaznicima koji se stavljaju na glavu, moguće je koristiti neku vrstu 3D miša ili tzv. *Wii controller* koji daje informacije o nagibu, položaju i promjeni položaja, a moguće je koristiti i sustav jedne ili više kamera koji snimaju korisnika te analiziraju njegove pokrete te iste prenose u virtualnu okolinu. Potonje je moguće zbog kontrolirane okoline u kojoj se korisnik nalazi.

Područje projekcije



Cirkularno platno

Slika 10: Ilustracija cirkulane izvedbe sustava *PanoVrama*

Naime, korisnik se sigurno nalazi unutar cilindričnog platna.

Navedeni sustav omogućuje i sudjelovanje više korisnika u virtualnoj okolini, no mogućnost interakcije i kontrolu nad promjenom položaja u virtualnoj okolini će ipak imati samo jedan korisnik. Takvo nešto ne mora nužno biti loše, naime jedan korisnik može biti „vodič” kroz virtualnu okolinu dok ostali korisnici mogu biti „putnici” ili „turisti” koji samo razgledavaju virtualnu okolinu. U tom slučaju će „vodič” upravljati položajem virtualnoj okolini i vršiti interakciju s virtualnom okolinom dok će ostali korisnici samo uživati u doživljaju virtualne okoline.

5. Postupci sinkronizacije u distribuiranoj vizualizaciji

Sustav *PanoVrama* se sastoji od više projektor i više računala na koje su ti projektori spojeni. Ta računala su međusobno umrežena. Zbog toga jedan od većih problema vizualizacije virtualnih okolina pomoću navedenog sustava predstavlja i vremenska sinkronizacija računala koji projiciraju sliku. Naime, budući da svaki projektor prikazuje samo dio veće slike, potrebno je osigurati da prilikom prikaza pokretne scene jedan dio slike ne kasni za drugim dijelom slike, tj. trenuci iscrtavanja iste slike moraju na svim računalima biti isti.

Da bi se navedeni zahtjev osigurao, svako računalo mora točno znati koju sliku treba u kojem trenutku iscrtavati. Najjednostavnija ideja kojom bi se mogao pokušati riješiti navedeni problem je u korištenju identičnih računala s identičnim projektorima. Pretpostavka je tada da će svako računalo moći jednakom brzinom iscrtavati svoj dio videa te da će cijeli sustav biti sinkroniziran. Jedino je na početku potrebno pokrenuti izvođenje videa na svim računalima u isto vrijeme. Nažalost, takva ideja ne rješava problem. Naime, čak i ako imamo ista računala za svaki dio slike, moguće je da se početna sinkronost vizualizacije tijekom vremena izgubi. Jednostavan primjer toga je slučaj da u jednom računalu na red izvođenja dođe neki pozadinski proces i on potroši previše procesorskog vremena pa onda proces koji iscrtava dio slike prekasno dođe na red i ne stigne na vrijeme iscrtati svoj dio. Budući da ideja ne predlaže nikakvu sinkronizaciju među računalima tijekom prikaza vizualizacije, u tom slučaju se sinkronost izgubi za cijelo vrijeme vizualizacije. Očito je potrebno problem drugačije riješiti.

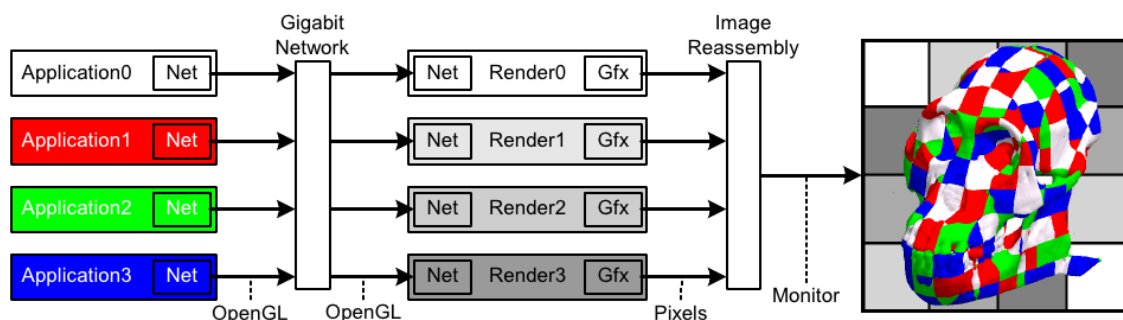
Moguća izmjena navedene ideje bi bila da centralni poslužitelj svakom računalu u određenim trenucima šalje vremensku markicu, kako bi svako računalo moglo znati koju sliku zapravo treba prikazati. Problem kod takve ideje jest u tome što ako prečesto šaljemo vremensku markicu previše zagušujemo mrežu, a ako ju prerijetko šaljemo, postoji mogućnost razilaženja u sinkronosti u određenim dijelovima vizualizacije. Npr. ako šaljemo markicu svakih 5 minuta, moguće je da u 4. minuti već imamo veliko razilaženje u sinkronosti računala.

5.1. Prijašnji radovi

Prijašnji sustavi za distribuiranu višeprojektorsku vizualizaciju se nisu posebno bavili tim problemom, već su se fokusirali na vizualizaciju manje dinamičnih scena kako se eventualna kašnjenja pojedinog računala ne bi primijetila. U [3] je korišten specijalni hardver za prenošenje slike do samih projektor i kako bi se minimiziralo kašnjenje, tj. kako bi se izbjeglo mrežno kašnjenje u samom prikazu slike. Međutim, navedeni sustav je ipak sadržavao određeno kašnjenje u prikazu jer su aplikacije koje su generirale

prozore koji su se trebali prikazati bile smještene na udaljenim računalima. Izvođenje videa s brzim i dinamičnim scenama nije bilo moguće vizualizirati u tom sustavu.

U [1], [2] i [4] se je sinkronizacija radila samo na razini scene koja se prikazuje. Konkretno, protokol se je brinuo da određeno računalo ne iscrtava drugačiju scenu od ostalih računala koje iscrtavaju istu sliku po dijelovima. Međutim, u radovima se ne spominje postojanje vremenske sinkronizacije trenutaka iscrtavanja određenih scena. No ipak se u opisu protokola opisuje način pakiranja podataka o promjeni scene u mrežne pakete kako bi se odaslalo čim manje paketa te bi se na taj način minimizirao utjecaj mrežnog kašnjenja. Iako je ovaj protokol vrlo dobar za većinu primjena, prilikom vizualizacije brzih i dinamičnih scena doći će do razilaženja u sinkronosti prikaza scene na različitim računalima. Dobra odlika tog protokola jest u tome što će takvo razilaženje biti samo privremeno, tj. čim dođe na red vizualizacija mirnije scene, računala će opet biti sinkronizirana u iscrtavanju.



Slika 11: Shema sustava opisanog u [2] i [4]

Međutim, iscrtavanje dinamičnih scena nije bio ni cilj navedenog sustava, već je isti služio za paralelno renderiranje kompleksnih 3D scena te je svako računalo renderiralo samo dio scene kako bi se ukupno renderiranje ubrzalo. Kao što možemo i vidjeti, kompleksne 3D scene koje se ne mogu renderirati na samo jednom računalu nego ih je potrebno imati više često nisu dinamičke nego najčešće predstavljaju vizualizaciju velikog skupa podataka. U tim slučajevima kašnjenje iscrtavanja pojedinog računala uzrokovano mrežnim kašnjenjem je zanemarivo. Zbog toga taj protokol nije dobar za potrebe vizualizacije virtualnih okolina gdje je moguća pojava brzih i dinamičnih scena i gdje je bitno da kašnjenje u iscrtavanju ne ometa korisnikov doživljaj virtualne okoline.

5.2. Vremenska sinkronizacija u sustavu *PanoVrama*

U sustavu *PanoVrama* je navedeni problem riješen uz pomoć vremenske sinkronizacije putem NTP protokola (engl. *Network Time Protocol*) [5]. Protokol služi za sinkronizaciju satova računala preko mreže. Iako u mreži postoje kašnjenja te nepouzdanost

dostave paketa, protokol omogućava točnost sinkronizacije satova uz odstupanje od 10 milisekundi prilikom sinkronizacije preko Interneta, odnosno 200 mikrosekundi prilikom sinkronizacije unutar lokalne mreže uz idealne uvjete [9]. Budući da se većina vizualizacija na sustavu *PanoVrama* izvodi uz prikaz tek nešto više od 30 slika u sekundi, odstupanje u satovima računala od 200 mikrosekundi ne predstavlja problem. Štoviše, za prikaz videa brzinom od 30 slika u sekundi problem ne predstavlja čak ni odstupanje od 10 milisekundi. No, u slučajevima da želimo neku drugu vizualizaciju prikazivati većom brzinom (npr. vizualizaciju virtualne okoline), potrebno je ostvariti manje odstupanje u satovima računala.

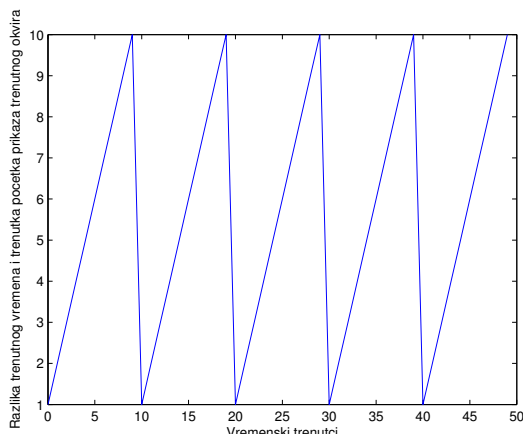
Računala sustava *PanoVrama* se prilikom pokretanja sustava vremenski sinkroniziraju s lokalnim poslužiteljem. Na taj način se osigura da sva računala mjere približno isto vrijeme (uz dozvoljeno odstupanje od nekoliko milisekundi). U drugom koraku računala učitaju video ili neku drugu vizualizaciju koju treba prikazati, no ne počnu je odmah prikazivati nego umjesto toga prikazuju neku statičnu scenu (npr. logotip sustava ili crnu sliku). Kada se treba pokrenuti vizualizacija, poslužitelj svakom računalu pošalje poruku s naredbom za pokretanje vizualizacije i budućom vremenskom oznakom. Poslužitelj će osigurati da buduća vremenska oznaka bude u dovoljnoj budućnosti da svako računalo sigurno može primiti i obraditi dobivenu poruku. Kada nastupi taj budući trenutak, sva računala počnu s prikazom svojeg dijela vizualizacije.

Kako bi se onemogućio problem razilaženja u sinkronosti tijekom vremena, svako računalo računa u kojem trenutku treba promijeniti sliku koju prikazuje. Budući da satovi na svim računalima mjere isto vrijeme, svako računalo će izračunati jednake vremenske trenutke u kojima treba promijeniti sliku koju prikazuje (npr. učitati sljedeći okvir videa ili pomaknuti neke objekte na sceni virtualne okoline). Parametri funkcije po kojoj svako računalo računa trenutke u kojima treba promijeniti svoj okvir koji prikazuje se prenose svakom računalu tijekom postupka inicijalizacije sustava. Npr. poruke s naredbom o pokretanju opisane ranije osim same vremenske oznake mogu sadržavati i parametre funkcije za računanje vremenskih trenutaka u kojima će se mijenjati okvir koji se prikazuje.

5.3. Sinkronizacija u slučaju vizualizacije bez interakcije

U slučaju prikaza video sekvenci ili virtualnih okolina bez mogućnosti korisničke interakcije s virtualnom okolinom, funkcija za izračunavanje trenutaka promjene okvira je relativno jednostavna. Jedinu potrebni parametar je broj okvira u sekundi koje računalo treba iscrtavati. Računalo će tada iscrtavati koliko god može okvira u jedinici vremena, no tek kad ustanovi da je došao trenutak u kojem treba promijeniti okvir koji prikazuje,

ono će to i učiniti. U suprotnom će iscrtavati uvijek isti okvir. Primjer takve funkcije je



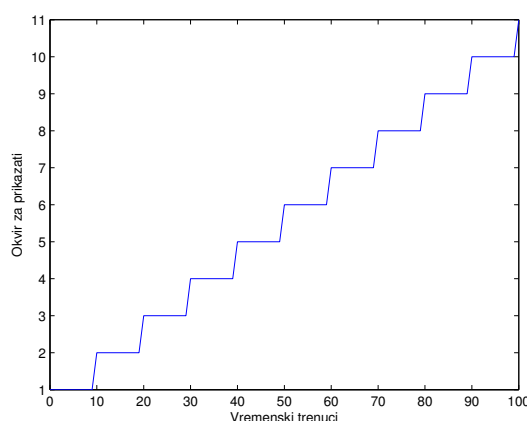
Slika 12: Funkcija koja prikazuje kako treba mijenjati okvire.

prikazan na slici 12. Horizontalna os prikazuje vremenske trenutke, a vertikalna razliku trenutnog vremenskog trenutka i trenutka u kojem se je počeo prikazivati trenutni okvir. Kada ta razlika postane dovoljno velika, dolazi do promjene okvira za prikaz. Funkcija je periodična te je svakom računalu dovoljno znati tek jedan njezin period. Kada se prođe kroz cijeli period, dolazi do promjene okvira.

Valja uočiti da navedeni opis sinkronizacije računala vrijedi samo ako svako računalo može okvire iscrtavati brže ili jednako brzini vizualizacije. Npr. ako je riječ o prikazu video sekvence brzine 30 slika u sekundi, svako računalo mora moći iscrtavati okvire barem tom brzinom, tj. mora iscrtavati barem 30 sličica u sekundi. U suprotnom će se sinkronost razići. Naime, ukoliko neko računalo ne stigne dovoljno brzo iscrtavati okvire, tj. period funkcije je manji od perioda s kojim se poziva naredba crtanja dogodit će se situacija u kojoj će jedno računalo nacrtati dva okvira, a drugo tek jedan. U sljedećoj iteraciji će prvo računalo tada već crtati treći okvir, dok drugo tek drugi, tj. drugo računalo će zaostajati jedan okvir za prvim. S vremenom će doći i do uočljive razlike u sinkronosti.

Zbog toga je potrebno sporijim računalima omogućiti da ukoliko ne stignu nacrtati jedan ili više okvira da ih jednostavno preskoče, tj. da nastave crtati iste okvire kao i druga računala, bez obzira što neke okvire nisu nacrtala. To će možda na nekim računalima uzrokovati privremene efekte trzanja, no u svakom slučaju su ti efekti poželjniji nego da to računalo izgubi sinkronost s ostalima za stalno.

Da bi se to omogućilo potrebno je funkciju za sinkronizaciju napraviti takvom da omogućuje ne samo očitavanje trenutka kada treba promijeniti okvir nego uz to dati i informaciju koji okvir treba prikazati. Moguća modifikacija takve funkcije je prikazana na slici 13. Horizontalna os opet prikazuje vremenske trenutke, ali vertikalna ovaj put



Slika 13: Funkcija koja pokazuje u kojim vremenima treba koji okvir prikazati.

pokazuje redni broj okvira kojeg treba prikazati. U ovom slučaju ako je period iscr-
tavanja okvira nekog računala manji od intervala promjene okvira, računalo će svaki
put pomoću te funkcije izračunati točni redni broj okvira kojeg treba prikazati te ga i
prikazati, ukoliko je isti dostupan. Ukoliko nije, moguće je eventualno kašnjenje zbog
učitavanja traženog okvira, no to se lako izbjegava na način da se više okvira video
sekvence unaprijed učita u međuspremnik. Taj problem se ne pojavljuje u slučajevima
kad se vrši vizualizacija neke virtualne okoline, budući da se u tom slučaju svaki ok-
vir generira temeljem trenutnog virtualnog položaja promatrača u virtualnoj okolini. U
tom slučaju je dovoljno pozvati funkciju za crtanje okvira s rednim brojem okvira kao
parametrom te će se okvir crtati otprilike jednako dugo kao i svaki drugi pa neće biti
kašnjenja kao u slučaju prikaza video sekvenci.

Eventualna mana ovakvog pristupa jest u tome što je potrebno svakom računalu
poslati cijeli izgled funkcije, tj. za svaki trenutak treba poslati redni broj okvira koji se
prikazuje. To može biti veliki problem, budući da veličina takvog podatka može biti vrlo
velika. No, budući da se ta funkcija ionako mora izgenerirati, moguće ju je generirati na
svakom računalu posebno, a ne na poslužitelju. Na taj način je moguće riješiti problem
prijenosa funkcije na svako računalo.

5.4. Sinkronizacija u slučaju vizualizacije s interakcijom

Ako zahtijevamo interakciju korisnika s virtualnom okolinom, tada okvir koji se pri-
kazuje ovisi o korisničkoj akciji. Tj. korisnik svojim postupcima utječe na izgled okoline,
odnosno okvira kojeg prikazujemo. Interakcija može biti u obliku da korisnik mijenja
svoj položaj u virtualnoj okolini, da na neki način mijenja okolinu ili u slučaju prikaza
video sekvenci mijenja način izvođenja videa, npr. ubrzava izvođenje, usporava ga, do-

daje neke efekte videu itd. Kao što je već ranije objašnjeno, korisnik može interaktivirati sa sustavom pomoću raznih uređaja, poput 3D miša, *Wii controllera* i sl. Također je moguće da jedna ili više kamera snimaju korisnika te hvataju njegove pokrete te ih interpretiraju za potrebe interakcije s virtualnom okolinom.

Međutim, uređaj koji prima signale od korisnika je najčešće spojen samo s jednim računalom, a sva računala moraju primati te signale i adekvatno ih interpretirati. Zbog toga je potrebno korisničke signale distribuirati do svakog računala. Kada bismo signal odmah prenosili svakom računalu i njemu prepustili reagiranje na taj signal, moglo bi doći do razilaženja u sinkronosti vizualizacije zbog mogućnosti da putovanje signala mrežom do nekog računala može trajati duže nego do drugog, ali i zbog mogućnosti da jedno računalo brže obradi signal nego neko drugo. Također je moguće da korisnički signal bude prevelik da ga se u stvarnom vremenu distribuira do svakog računala.

Zbog toga predlažem realizaciju distribucije informacije kao u slučaju inicijalizacije sustava. Kao što je ranije objašnjeno, prilikom inicijalizacije vizualizacije poslužitelj svakom računalu pošalje naredbu za pokret i vremensku oznaku u kojoj pokret mora nastupiti. Pritom poslužitelj osigurava da je vremenska oznaka u dovoljnoj budućnosti da svako računalo stigne primiti poruku i obraditi je. Slično bi se ovdje korisnički signal interpretirao na poslužitelju, odnosno na računalu na kojeg je spojen uređaj pomoću kojeg korisnik vrši interakciju sa sustavom. Nakon obrade signala, poslužitelj generira poruku s naredbom koju svako računalo treba izvršiti i vremenskom oznakom koja govori kad se ta naredba treba izvršiti. Naredba npr. može biti zahtjev za promjenom pozicije u virtualnoj okolini ili u slučaju prikaza videa naredba može biti zahtjev za promjenom funkcije sinkroniziranja, tj. ako korisnik želi ubrzati izvođenje videa, smanjit će se period promjene okvira, a ako želi usporiti video, povećat će se period promjene okvira.

Poslužitelj mora izračunati vremensku oznaku tako da se osigura da ona bude u dovoljno dalekoj budućnosti da svako računalo stigne primiti poruku s naredbom te da se stigne pripremiti za izvođenje te naredbe prije nego stigne trenutak u kojem treba izvršiti samu naredbu. Npr. za slučaj da korisnik želi promijeniti video sekvencu, vremenska oznaka pokretanja nove video sekvence mora biti u dovoljnoj budućnosti da svako računalo stigne primiti naredbu da zaustavi trenutnu sekvencu i učitava novu sekvencu tako da okviri nove sekvence budu spremni za prikaz u trenutku kada je potrebno te okvire prikazati. S druge strane, za slučaj vizualizacije virtualne okoline te naredbe za promjenu položaja korisnika u virtualnoj okolini, dovoljno je svakom računalu poslati nove koordinate položaja korisnika u okolini. Tada će svako računalo znati iz kojeg pogleda je potrebno iscrtavati okvir.

Poruka koja sadrži naredbu i vremensku oznaku u kojoj se ta naredba mora izvr-

šiti mora biti relativno mala, a naredba mora biti jednostavna. Tj. slanje poruke svim računalima i izvođenje naredbe na svakom računalu mora biti dovoljno brzo da korisnik to ne primijeti. Drugim riječima, ne želimo da sustav previše kasni na korisničku akciju. Navedeni zahtjev je moguće ispuniti koristeći brzu mrežu, relativno mali broj računala te pogodnu kompresiju poruka. Mreža mora biti brza kako bi se poruke čim brže mogle dostavljati računalima. Mali broj računala i nije nužan zahtjev, budući da poslužitelj ne mora nužno svakom računalu posebno slati poruku već, ukoliko to mreža podržava, poslati svim računalima poruku istovremeno (tzv. *Broadcast*, odnosno *Multicast*). Kompresija poruka ne smije biti presložena, tj. svako računalo mora biti u mogućnosti relativno brzo dekomprimirati poruku, no ipak mora dovoljno sažeti poruku kako bi se ista brže mogla dostaviti. Problem efikasne kompresije poruka za potrebe komunikacije u stvarnom vremenu je zaseban problem te neće biti detaljno analiziran u ovom radu.

6. Zaključak

Razvoj sustava za razne simulacije i vizualizacije virtualnih okolina je vrlo težak. Zbog toga je i bilo potrebno gotovo cijelo stoljeće razvoja takvih sustava. Današnji sustavi za vizualizaciju virtualnih okolina su još uvijek skupi, prvenstveno zbog opreme koja dodatno povećava dozu realističnosti doživljaja virtualne okoline. S druge strane, najobičniji monitori svakodnevnih računala su dovoljni da prosječnim korisnicima vizualiziraju određene virtualne okoline, što se često koristi u računalnim igrama.

Osim za zabavu i potrebe simulacije, sustavi za vizualizaciju virtualnih okolina su pronašli svoju primjenu u različitim granama industrije, znanosti i umjetnosti, uključujući medicinu, industriju, građevinu, arheologiju, multimedijску umjetnost itd. Zbog sve veće primjene sustava za vizualizaciju virtualnih okolina potrebno je osmisliti čim bolje sustave za tu namjenu. Često obični monitori i projektori nisu dovoljni te je potrebno ostvariti čim vjerniju vizualizaciju koja uključuje i druge podražaje, poput mirisa, dodira, okusa i slično. Također je potrebno omogućiti vizualizaciju virtualnih okolina za više osoba istovremeno, kako bi se omogućio svojevrsni „turistički” obilazak virtualnih svjetova.

Sukladno zahtjevima razvija se i tehnologija vizualizacije. Danas su vjerojatno najpopularniji sustavi za vizualizaciju virtualnih okolina prikaznici koji se stavljaju na glavu. Međutim, takvi uređaji su još uvijek veoma skupi te si ih većina korisnika koji bi tek povremeno željeli iskusiti virtualne svjetove ne mogu priuštiti. Zbog toga na našem Fakultetu razvijamo sustav za vizualizaciju virtualnih okolina *PanoVrama* koji će omogućiti grupni obilazak virtualnih svjetova uz „vodiča”. Sustav se sastoji od više umreženih računala koji upravljaju projektorima koji svaki prikazuje dio široke slike. Slika se može projicirati na ravno platno te se u tom slučaju omogućuje panoramska vizualizacija vrlo velikih rezolucija. S druge strane, moguće je projicirati sliku na cilindrično 360° platno koje korisniku unutar platna omogućuje pregled virtualne okoline sa svih svojih strana.

Distribuirani sustav ima i svoje nedostatke, od kojih je glavni problem sinkronizacije računala da prikazuju istu scenu. Naime, ne smije se dopustiti da jedno računalo u svojem prikazu kasni za ostalim računalima. Zbog toga su analizirani razni algoritmi sinkronizacije koji omogućuju prevladavanje navedenog nedostatka. Ovisno o stupnju sinkronizacije koji se želi postići, algoritmi mogu postati poprilično komplicirani. Stoga je važno napraviti dobru procjenu između želja i mogućnosti i odabrati onaj algoritam koji zadovoljava zahtjeve koji se stavljaju pred sustav koji se gradi, a opet nisu prekomplikirani za izvedbu.

7. Literatura

- [1] G. Humphreys, I. Buck, M. Eldridge, and P. Hanrahan. Distributed rendering for scalable displays. In *Proceedings of the 2000 ACM/IEEE conference on Supercomputing (CDROM)*, page 30. IEEE Computer Society, 2000.
- [2] G. Humphreys, M. Eldridge, I. Buck, G. Stoll, M. Everett, and P. Hanrahan. WireGL: a scalable graphics system for clusters. In *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 129–140. ACM, 2001.
- [3] G. Humphreys and P. Hanrahan. A distributed graphics system for large tiled displays. In *Proceedings of the conference on Visualization'99: celebrating ten years*, pages 215–223. IEEE Computer Society Press, 1999.
- [4] G. Humphreys, M. Houston, R. Ng, R. Frank, S. Ahern, P.D. Kirchner, and J.T. Klosowski. Chromium: a stream-processing framework for interactive rendering on clusters. In *ACM SIGGRAPH ASIA 2008 courses*, pages 1–10. ACM, 2008.
- [5] D. Mills, J. Martin, J. Burbank, and W. Kasch. Network Time Protocol Version 4: Protocol and Algorithms Specification. RFC 5905 (Proposed Standard), June 2010.
- [6] D. Reiners, D. Stricker, G. Klinker, S. Müller, and IGD Fraunhofer. Augmented reality for construction tasks: doorlock assembly. In *Augmented Reality: Placing Artificial Objects in Real Scenes, Proceedings of IWAR'98*.
- [7] RA Robb. Virtual endoscopy: development and evaluation using the Visible Human datasets. *Computerized medical imaging and graphics*, 24(3):133–151, 2000.
- [8] Wikipedia. Morton heilig — wikipedia, the free encyclopedia, 2010. [Online; accessed 6-April-2011].
- [9] Wikipedia. Network time protocol — wikipedia, the free encyclopedia, 2011. [Online; accessed 14-April-2011].
- [10] Wikipedia. Online text-based role-playing game — wikipedia, the free encyclopedia, 2011. [Online; accessed 6-April-2011].
- [11] Wikipedia. Sensorama — wikipedia, the free encyclopedia, 2011. [Online; accessed 6-April-2011].

[12] Wikipedia. Virtual reality — wikipedia, the free encyclopedia, 2011. [Online; accessed 6-April-2011].

8. Sažetak

U ovom radu dan je pregled sustava za simulacije i vizualizacije virtualnih okolina. Prvo je dan povijesni pregled razvoja takvih sustava. Zatim je opisana primjena takvih sustava u raznim granama industrije, znanosti i umjetnosti. U sljedećem poglavlju je dan pregled postojećih tehnologija vizualizacije virtualnih okolina te je opisan sustav *PanoVrama* koji je razvijen na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu. Posljednje poglavlje se bavi analizom raznih algoritama sinkronizacije računala u distribuiranom sustavu za vizualizaciju te su opisani algoritmi korišteni za sinkronizaciju vizualizacije u sustavu *PanoVrama*.